

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

**Kristina Petković**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Studentica:

Kristina Petković

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Lovorki Grgec Bermanec na pomoći s radom i korisnim uputama. Također se zahvaljujem gospodinu Jošku Zelki na uputama i pomoći pri provedbi mjerenja.

Kristina Petković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Kristina Petković**

Mat. br.: 0035199185

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sustava za umjeravanje mjerila negativnog tlaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: ***Design of calibration system in the negative pressure range***

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati mjerni sustav za sljedivo umjeravanje mjerila negativnog tlaka metodom usporedbe. Predvidjeti umjeravanje u režimu potlak do -950 hPa koristeći plin kao radni medij. U radu koristiti dijelove postojeće mjerne opreme Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje te opisati umjerne protokole s prijedlogom pripadajućih mjernih listova.

Potrebno je izraditi:

- Pregled normi i uputa za umjeravanje mjerila tlaka.
- Opis međulaboratorijske usporedbe u području -950 do 0 hPa
- Projektiranje i sastavljanje mjerne linije uz opis sheme spajanja.
- Proračun efektivnog tlaka na temelju rezultata EURAMET 1170 usporedbe.
- Primjere s rezultatima umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 23. veljače 2018.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2018.  
**3. rok:** 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 26.2. - 2.3. 2018.  
**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2018.  
**3. rok:** 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadan:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. TLAK.....	2
2.1. Definicija i mjerne jedinice.....	2
2.2. Metode mjerenje tlaka.....	4
3. MJERILA TLAKA.....	5
3.1. Tlačna vaga .....	5
3.1.1. Osnovni dijelovi.....	5
3.1.2. Osnovne konfiguracije tlačne vage .....	6
3.1.3. Princip rada .....	7
3.1.4. Korekcije i izračun ispitivanog tlaka .....	8
3.1.4.1. Pretlačni režim rada .....	9
3.1.4.2. Rad tlačne vage u apsolutnom režimu rada .....	9
3.2. Barometar.....	10
3.3. Pretvornici tlaka .....	11
4. UMJERAVANJE.....	12
4.1. Općenito o umjeravanju .....	12
4.1.1. Mjerna nesigurnost [3] .....	14
4.1.2. Ocjenjivanje rezultata umjeravanja.....	15
4.2. Umjeravanje mjerila tlaka.....	16
4.2.1. EURAMET cg-17 [6] .....	16
4.2.1.1. Osnovna procedura umjeravanja.....	17
4.2.1.2. Standardna procedura umjeravanja.....	17
4.2.1.3. Opsežna procedura umjeravanja .....	17
4.2.2. DKD-R 6-1 [7] .....	17
4.2.2.1. Metoda A umjeravanja.....	19
4.2.2.2. Metoda B umjeravanja .....	20
4.2.2.3. Metoda C umjeravanja .....	21
4.3. Načini umjeravanja mjerila negativnog tlaka [2].....	21
4.3.1. Metoda 1 .....	21
4.3.2. Metoda 2 .....	22
4.3.3. Metoda 3 .....	23
5. MEĐULABORATORIJSKA USPOREDBE EURAMET 1170 .....	24
5.1. EURAMET .....	24
5.2. Projekt EURAMET 1170 [8] .....	24

---

5.2.1. Mjerenje laboratorija HMI/FSB-LPM .....	26
5.2.2. Analiza podataka.....	27
6. PROJEKTIRANJE MJERNE LINIJE I UMJERAVANJE .....	30
6.1. Sastavljanje mjerne linije .....	30
6.1.1. Tlačna vaga DHI PG 7601 .....	30
6.1.2. Ispitivano mjerilo .....	34
6.2. Postupak umjeravanja .....	35
6.2.1. Izračun efektivnog tlaka tlačne vage.....	36
6.2.2. Rezultati umjeravanja na umjeravanom mjerilu .....	38
7. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	45

## POPIS SLIKA

Slika 1. Odnos tlakova [3] .....	3
Slika 2. Podjela mjerila tlaka [4] .....	4
Slika 3. Vrste i područja primjene tlačnih vaga .....	5
Slika 4. Prikaz osnovnih dijelova tlačne vage .....	6
Slika 5. Konfiguracije tlačne vage .....	6
Slika 6. Barometar .....	10
Slika 7. Pretvornici tlaka .....	11
Slika 8. Lanac sljedivosti .....	13
Slika 9. Tolerancijske granice .....	15
Slika 10. Metoda A .....	20
Slika 11. Metoda B .....	20
Slika 12. Metoda C .....	21
Slika 13. Metoda 1 umjeravanja .....	22
Slika 14. Metoda 2 umjeravanja .....	23
Slika 15. Metoda 3 umjeravanja .....	23
Slika 16. Prijenosno mjerilo EURAMET 1170 .....	25
Slika 17. Shema mjerne linije HMI/FSB-LPM [9] .....	26
Slika 18. Prikaz rezultata HMI/FSB-LPM .....	29
Slika 19. Shema projektirane mjerne linije .....	30
Slika 20. Prikaz utega .....	31
Slika 21. Terminal za upravljanje .....	33
Slika 22. Regulator MPC1 .....	33
Slika 23. Umjeravani kalibrator tlaka .....	34
Slika 24. Rezultati umjeravanja .....	42

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Metode umjeravanja prema DKD-R 6-1 .....	19
Tablica 2. Laboratoriji sudionici .....	25
Tablica 3. Prikaz rezultata HMI/FSB-LPM .....	28
Tablica 4. Podaci iz umjernice za DHI PG 7601 [11] .....	31
Tablica 5. Podaci o utezima [11] .....	32
Tablica 6. Podaci o umjeravanom mjerilu .....	35
Tablica 7. Kombinacija utega .....	36
Tablica 8. EURAMET korekcija .....	37
Tablica 9. Proračun etalonskog tlaka .....	37
Tablica 10. Očitavanje TL KAL 02 .....	38
Tablica 11. Proračun nesigurnosti 1 .....	39
Tablica 12. Proračun nesigurnosti 2 .....	39
Tablica 13. Proračun nesigurnosti 3 .....	40
Tablica 14. Proračun nesigurnosti 4 .....	40
Tablica 15. Proračun nesigurnosti 5 .....	41
Tablica 16. Proračun nesigurnosti 6 .....	41
Tablica 17. Prikaz rezultata umjeravanja .....	42



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$p$	Pa	tlak
$A$	$m^2$	površina
$F$	N	sila
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$g$	$m/s^2$	gravitacijsko ubrzanje sile teže
$h$	m	visina
$w$	$kg/m^2s^2$	specifična težina fluida
$p_p$	Pa	pretlak
$p_v$	Pa	potlak
$p_o$	Pa	tlak okoline, atmosferski tlak
$p_e$	Pa	efektivni tlak
$A_e$	$m^2$	efektivna površina
$\alpha_k$	$^{\circ}C^{-1}$	koeficijent temperaturne ekspanzije klipa
$\alpha_c$	$^{\circ}C^{-1}$	koeficijent temperaturne ekspanzije cilindra
$t$	$^{\circ}C$	temperatura sklopa pri ispitivanju
$t_r$	$^{\circ}C$	referentna temperatura, 20 $^{\circ}C$
$A_o$	$m^2$	efektivna površina pri 20 $^{\circ}C$ i nultom tlaku
$\lambda$	$Pa^{-1}$	koeficijent elastične deformacije
$m_i$	kg	masa i-tog utega
$\rho_a$	$kg/m^3$	gustoća zraka okoline
$\rho_{mi}$	$kg/m^3$	gustoća i-tog utega
$v$	$m^3$	volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida
$\rho_f$	$kg/m^3$	gustoća radnog medija
$h$	m	razlika visini između etalonskog i ispitivanog sklopa
$\Gamma$	m	opseg klipa
$c$	N/m	površinska napetost ulja
$\theta$	$^{\circ}$	kut nagiba osi klipa u odnosu na verikalu
$\mu$	Pa	zaostali tlak u unutrašnjosti evakuiranog prostora
$p_A$	Pa	tlak evakuiranog dijela iznad žive
$p_{min}$	Pa	minimalni mjereni tlak
$p_{max}$	Pa	maksimalni mjereni tlak
$i$	mA	izmjerena struja
$u$	bar	standardna mjerna nesigurnost
$s$	bar	standardna devijacija

$x$	bar	eksperimentalno izmjerene vrijednosti
$\bar{x}$	bar	srednja vrijednost
$n$		broj mjernih serija
$a$	bar	poluinterval sigurnosti
$U$	bar	proširena mjerna nesigurnost
$k$		faktor prekrivanja
$M1 \dots M6$		mjerne serije
$p_{neg}$	Pa	negativni tlak
$p_{abs}$	Pa	apsolutni tlak
$p_{atm}$	Pa	atmosferski tlak
$u_{LPM}$	hPa	nesigurnost HMI/FSB-LPM laboratorija
$u_{p/c}$	hPa	nesigurnost DHI tlačne vage
$u_{amb}$	hPa	nesigurnost Vaisala barometra
$u_{DUT}$	hPa	nesigurnost ispitivanog mjerila
$d_i$	hPa	odstupanje od referentne vrijednosti i-tog laboratorija
$x_i$	hPa	odstupanje očitavanja i-tog laboratorija od očitavanja DUT-a
$x_{ref}$	hPa	referenta vrijednost odstupanja
$U(d_i)$	hPa	Proširena standardna nesigurnost i-tog laboratorija
$E_n$		statistički koeficijent
$p_{neg}'$	Pa	korigirani negativni tlak
$u(E_1)$	Pa	nesigurnost etalonske tlačne vage
$u(E_2)$	Pa	nesigurnost etalonskog barometra
$h$	Pa	histereza
$u(h)$	Pa	mjerna nesigurnost uslijed histereze
$u(rez.)$	Pa	mjerna nesigurnost uslijed rezolucije umjeravanog uređaja
$r$		rezolucija

## SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog završnog rada bio je projekt sustava za umjeravanje mjerila negativnog tlaka uzimajući u obzir korekciju iz međulaboratorijske usporedbe EURAMET 1170. EURAMET 1170 je međulaboratorijska usporedba mjerenja negativnog tlaka u rasponu od -950 do 0 hPa provedena između 14 europskih nacionalnih laboratorija u kojem je sudjelovao i HMI/FSB-LPM laboratorij.

U radu je opisan pojam tlaka i dat pregled mjerila tlaka. Poblje je opisan princip rada tlačne vage te njene osnovne izvedbe.

Nadalje, dat je pregled metoda i uputa za umjeravanje instrumenta za mjerenje tlaka te su opisani mogući načini umjeravanja mjerila negativnog tlaka.

Eksperimentalni dio rada proveden je u HMI/FSB-LPM laboratoriju. U laboratoriju je sastavljena mjerna linija za umjeravanja mjerila negativnog tlaka i provedeno je umjeravanje kalibratora tlaka TL KAL 02.

Umjeravanje u okviru ovog rada provedeno je prema DKD-R 6-1 smjernicama te je odabran tip C umjeravanja, a u proračun efektivnog tlaka uvedena je EURAMET 1170 korekcija.

Proračun je proveden u programu Excel, a rezultati su prikazani tablično i grafički.

Ključne riječi: umjeravanje, negativni tlak, EURAMET 1170, tlačna vaga

## **SUMMARY**

The main task of this final paper was the project of a calibration system for negative pressure gauges, taking into account the correction from the EURAMET 1170 interlaboratory comparison. EURAMET 1170 is an interlaboratory comparison in the negative gauge pressure range from -950 to 0 hPa conducted among 14 European National Laboratories in which HMI/FSB-LPM laboratory had participated.

The paper describes the concept of pressure and provides a description of pressure measuring instruments. The principle of the pressure balance and its basic performance are described more closely.

Furthermore, a review of the methods and instructions for calibration of the pressure measurements is given. Possible ways of calibrating the negative pressure gauges are described.

The experimental part of the work was carried out in the HMI/FSB-LPM laboratory. Measuring line for calibration of the negative pressure gauges was assembled and calibration of the TL KAL 02 pressure calibrator was performed.

The calibration in this paper was carried out according to C type calibration from DKD-R 6-1 guidelines. The EURAMET 1170 correction was included in the calculation of effective pressure.

The calculation was carried out in Excel and the results are presented in tables and graphs.

Key words: calibration, negative pressure, EURAMET 1170, pressure balance

## 1. UVOD

Mjeriteljstvo ima vrlo važnu ulogu u današnjem svijetu, a potreba za nekom vrstom mjerenja pojavljuje se u gotovo svim područjima ljudskog djelovanja, uključujući trgovinu, medicinu, meteorologiju, naftno-petrokemijsku industriju i druge različite grane industrije. U Europi danas, troškovi mjerenja i vaganja istovrijedni su iznosu od 6 % bruto nacionalnoga proizvoda Hrvatske, te je tako mjeriteljstvo postalo bitan čimbenik naše svakodnevnice. Mjeriteljstvo je jedna od najstarijih znanstvenih disciplina te je znanje o tome kako se ono primjenjuje temeljna potreba u gotovo svim znanstveno utemeljenim zanimanjima, stoga se zaključuje da je znanost potpuno ovisna o mjerenju [1].

Umjeravanje je grana mjeriteljstva koja obuhvaća skup postupaka kojima se u određenim uvjetima postavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Umjeravanje ima veliku ulogu u svakodnevici jer je bitno da mjerni instrumenti pokazuju točne vrijednosti.

Mjerenje tlaka bitno je za mnoge tehnološke procese kao i u medicinske svrhe. Negativni tlak je pojava kad je tlak manji od atmosferskog tlaka, te je to mjera za veličinu koliko je tlak manji od tlaka okoline. Mjerenje negativnog tlaka postaje sve važnije radi primjene u mnogim znanstvenim i tehnološkim procesima kao što su tehnologija čiste sobe, petrokemijska i farmaceutska industrija, skladištenje nuklearnog i toksičnog otpada. Metode mjerenja apsolutnog tlaka i pretlaka su dobro istražene i utvrđene, međutim kad se one primjene na mjerenje negativnog tlaka dolazi do značajnih pogrešaka [2]. Upravo zbog toga provode se studije i međulaboratorijske suradnje radi utvrđivanja normi i okvira za mjerenje negativnog tlaka. Jedna takva međulaboratorijska suradnja je EURAMET 1170 usporedba u kojoj je sudjelovao i laboratorij našeg fakulteta. Korekcija za mjernu liniju FSB laboratorija koja proizlazi iz navedene usporedbe uključena je u umjeravanje provedeno u ovom završnom radu.

## 2. TLAK

### 2.1. Definicija i mjerne jedinice

Tlak  $p$  je fizikalna veličina koja je za fluid u mirovanju definirana kao normalna sila  $F$  na jedincu površine  $A$ , što je dano izrazom (1).

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

Sila je vektorska veličina koja ima svoju veličinu i smjer, pa općenito postoje tri osnovne komponente naprezanja tj. tlaka koje djeluju na površinu. Silom na neku površinu mogu djelovati kruto tijelo, tekućine ili plinovi. Kod plinova i tekućina molekule međusobno djeluju istim tlakom pod kojim se nalazi čitava masa. U plinovima i tekućinama tlak djeluje u svim smjerovima jednakim intenzitetom. Kod promatranja unutarnjih sila krutog tijela komponente tlaka mogu biti od važnosti pa se za opisivanja sila u materijalu koriste tenzori naprezanja. Sva mjerila tlaka koriste se za mjerenja tlaka u fluidu a ne u krutim tijelima te korištenje tenzora naprezanja nije potrebno.

U mehanici fluida tlak je uzrokovan težinom fluida, ovisi o gustoći fluida  $\rho$  i dubini  $h$  na kojoj se mjeri:

$$p = \rho gh \quad (2)$$

odnosno uvede li se  $w$  kao oznaka za specifičnu težinu fluida i  $h$  za visinu fluida diferencijalni izraz za tlak je oblika:

$$dp = -wdh \quad (3)$$

Sva osnovna mjerenja tlaka temelje se na jednadžbama (1) i (3) [3].

Mjerna jedinica za mjerenje tlaka je paskal [Pa], spada u grupu izvedenih SI jedinica. Paskal označava djelovanje sile od 1 N na površinu od 1 m<sup>2</sup>.

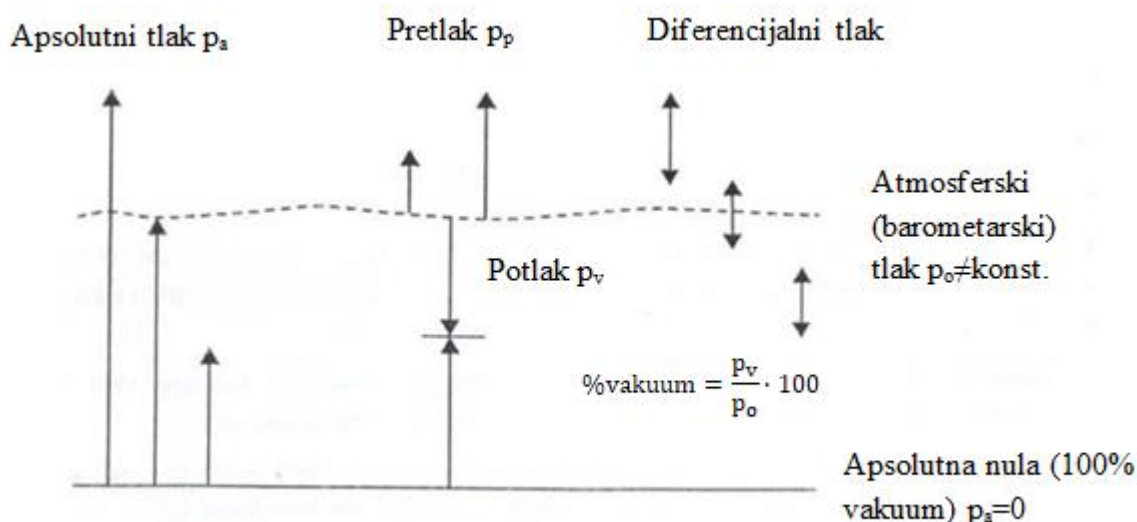
$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{kg}{ms^2} \quad (4)$$

Ostale često korištene jedinice za mjerenje tlaka su:

- bar  $1 \text{ bar} = 10^5 Pa$
- milimetar stupca žive  $1 \text{ mmHg} \approx 133,322 Pa$
- milibar  $1 \text{ mbar} = 100 Pa$

- hektopaskal  $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$
- inč stupca vode  $1 \text{ inH}_2\text{O} \approx 248 \text{ Pa}$
- inč stupca žive  $1 \text{ inHg} \approx 3386,39 \text{ Pa}$
- funta sile po kvadratnom palcu  $1 \text{ psi} = 1 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \approx 6894,76 \text{ Pa}$

Tlak je općenito rezultat djelovanja molekula unutar nekog fluida na stijenke posude. Ako se u posudi ne nalazi niti jedna molekula u njoj vlada tlak iznosa nula, tj. u posudi se nalazi vakuum. Razlikuju se tri tipa tlaka prema odabiru referentne vrijednosti: apsolutni, pretlak/potlak i diferencijalni tlak. Odnos tlakova prikazan je na slici 1.



Slika 1. Odnos tlakova [3]

Apsolutni tlak je tlak mjeren s apsolutnom nulom kao referentom vrijednošću.

Kod pretlaka i potlaka referenta vrijednost tlaka je tlak okoline, najčešće je to atmosferski tlak. Ako je tlak veći od tlaka okoline tada je to pretlak  $p_p$ , a ako je manji govori se o potlaku ili negativnom tlaku  $p_v$ . U donjim izrazima  $p$  označava apsolutni tlak, a  $p_o$  tlak okoline.

- Pretlak:  $p_p = p - p_o$  (5)
- Potlak:  $p_v = p_o - p$  (6)

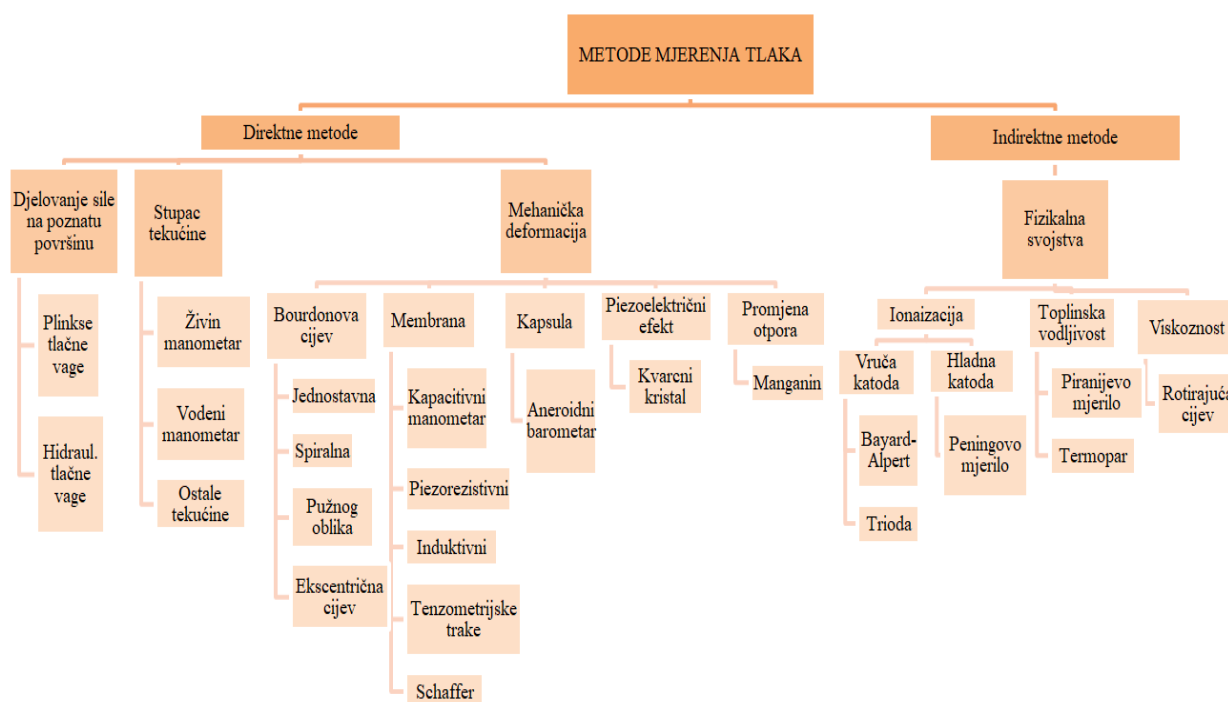
Diferencijalni tlak je tlak mjereno s nekom drugom odabranom referentnom vrijednošću te je to razlika između dva proizvoljna tlaka.

## 2.2. Metode mjerenje tlaka

U instrumentima za mjerenje tlaka koriste se sljedeće metode zasnovane na:

- Djelovanje sile na poznatu površinu
- Mjerenje visine stupca tekućine
- Mjerenje mehaničke deformacije osjetnog elementa
- Promjena fizikalnog svojstva mjerila

Na slici 2. su prikazana mjerila tlaka podijeljena po metodi koju koriste:



Slika 2. Podjela mjerila tlaka [4]

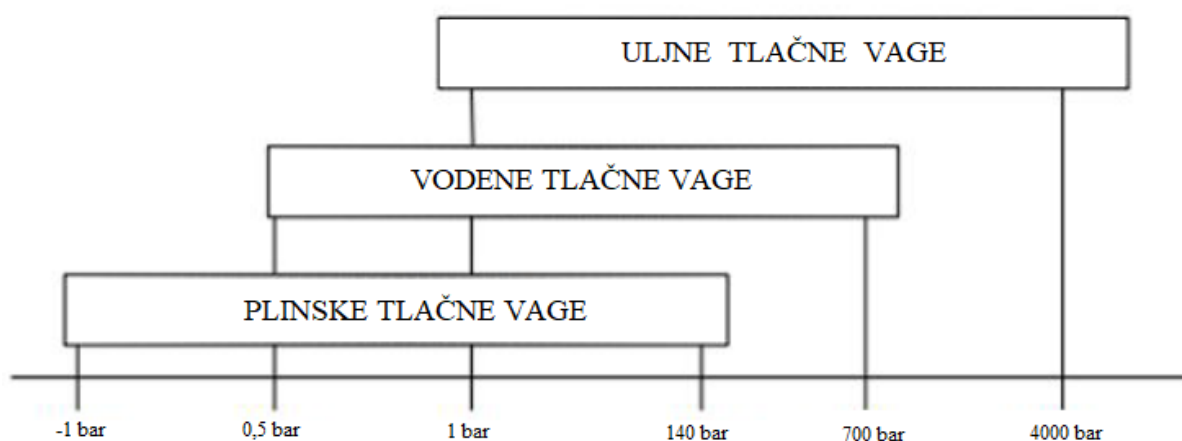
U okviru ovog završnog rada korišteni su: tlačna vaga, kalibrator tlaka i barometar. Navedena mjerila tlaka u nastavku su detaljnije opisana.



### 3. MJERILA TLAKA

#### 3.1. Tlačna vaga

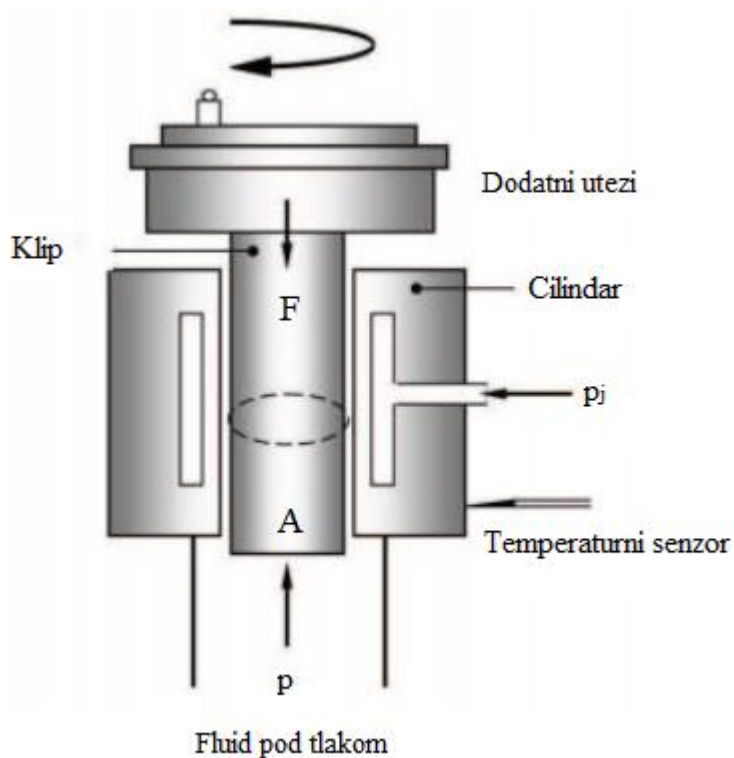
Tlačne vage su jedno od najtočnijih mjerila tlaka. Počele su se koristiti prije otprilike 150 godina te je njihov razvoj bio potaknut industrijskom primjenom parnih strojeva i potrebom za razumijevanjem termodinamičkih svojstava plinova i tekućina pri različitim temperaturama i tlakovima. Tlačne vage sistematiziraju se prema radnom mediju kojega koriste na: uljne, vodene i plinske. Radni medij određuje područje primjene pojedine tlačne vage, što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Vrste i područja primjene tlačnih vaga

##### 3.1.1. Osnovni dijelovi

Tlačna vaga se sastoji od precizno izrađenog okomitog klipa umetnutog u blisko prilagođeni cilindar, oboje poznatih poprečnih presječnih površina. Sklop klip-cilindar najvažniji je dio tlačne vage te određuje efektivnu površinu. Uz sklop klip-cilindar tlačna vaga sastoji se i od sustava za ostvarivanje vertikalne sile na klip te sustava za generiranje tlaka u radnom fluidu. Na slici 4. su prikazani osnovni dijelovi tlačne vage.

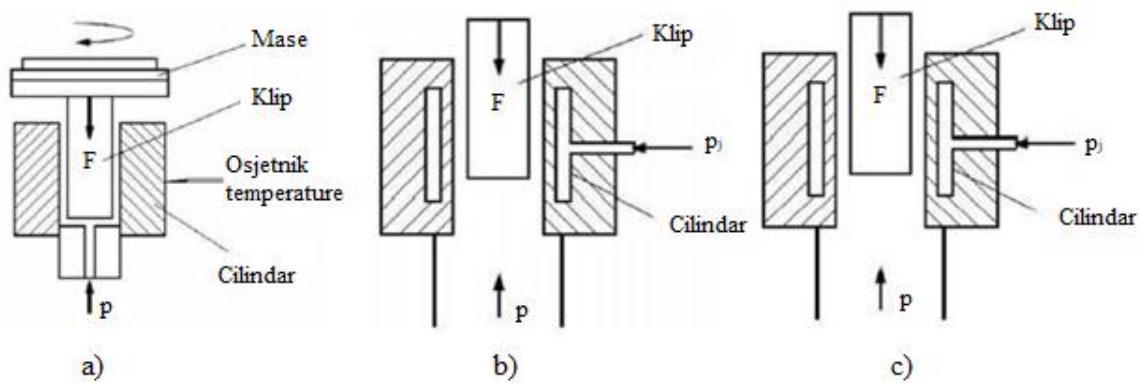


Slika 4. Prikaz osnovnih dijelova tlačne vage

### 3.1.2. Osnovne konfiguracije tlačne vage

Tlačne vage se s obzirom na konstrukciju sklopa klip-cilindar mogu podijeliti na:

- a) Tlačne vage jednostavne konfiguracije:  $p_j = 0$
- b) Tlačne vage s uvučenom konfiguracijom:  $p_j = p$
- c) Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom:  $p_j \neq p$  [3]



Slika 5. Konfiguracije tlačne vage

- a) Tlačne vage jednostavne konfiguracije su najrasprostranjeniji i najčešće upotrebljavan tip vaga. Mjereni tlak djeluje samo na bazu klipa. Klip i cilindar izloženi su slobodnoj elastičnoj deformaciji ovisnoj o tlaku, geometriji, elastičnim konstantama i fizikalnim svojstvima radnog fluida.
- b) Kod tlačnih vaga s uvučenom konfiguracijom mjereni tlak ne djeluje samo na donju bazu klipa-cilindra, već i na oplošje cilindra smanjujući time velike deformacije cilindra izloženog visokim tlakovima. Radni tlakovi sežu do 700 MPa, a kod specifičnih izvedbi čak i do 1 GPa.
- c) Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorima koriste se za mjerenje tlakova iznad 500 MPa, do čak 2 GPa, a operativne su čak i na srednjim tlakovima. To je omogućeno zahvaljujući pravilnom odabiru tlaka  $p_f$  kojim je moguće održavati konstantnu vrijednost zazora između klipa i cilindra, čime se posredno utječe i na željenu brzinu propadanja klipa. Veličina zazora ovisi o konstrukcijskoj geometriji sustava, inicijalnom zazoru između klipa i cilindra, vrijednostima  $p$  i  $p_f$ , konstanti elastičnosti klipa i cilindra te svojstvima radnog fluida.

### 3.1.3. Princip rada

Princip rada temelji se na zakonu promjene hidrostatskog tlaka. Na donji dio klipa dovodi se fluid pod određenim tlakom, najčešće je to dušik ili bijelo ulje, sve dok fluid ne djeluje na klip dovoljnom silom da ga s utezima podigne. Kad se razvije ravnoteža s tlakom u sistemu klip s dodatnim utezima slobodno rotira u cilindru i na taj način se eliminira trenje pa se tlak može izračunati iz jednadžbe (7) uz određene korekcije.

$$p_e = \frac{F}{A_e} \quad (7)$$

Fluid istječe kroz procjep između klipa i cilindra te film fluida omogućava podmazivanje između površina klipa i cilindra. Zbog neprestanog istjecanja fluida tlak mora biti kontinuirano dodavan u sistem da bi se održalo plutajuće stanje klipa. Ako je razmak između klipa i cilindra premali, klip ne može slobodno rotirati i trenje će uzrokovati velike greške u rezultatima mjerenja.

Ako je taj razmak prevelik, previše fluida će istjecati iz sustava što će uzrokovati pad tlaka u sustavu koji se ne može stabilno nadomještavati. Prema tome glavni zahtjevi za sklop klip-cilindar su:

- Materijal s malim koeficijentom temperaturne ekspanzije koji dobro podnosi naprezanja (obično volfram karbid, čelik, keramika)
- Površine izrađene na mikronskom nivou
- Konstanti mali međuprostor između klipa i cilindra (obično od 0,5  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$ )

### 3.1.4. Korekcije i izračun ispitivanog tlaka

U jednadžbu (7) potrebno je uvesti niz korekcija koje se odnose na:

- Korekcije efektivne površine:

- Utjecaj temperaturnog rastezanja klipa i cilindra

$$[1 + (\alpha_K + \alpha_C) \cdot (t - t_r)] \quad (8)$$

- Pojava elastične deformacije zbog djelovanja tlaka

$$[A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e)] \quad (9)$$

- Korekcije ukupne sile:

- Uzgonsko djelovanje zraka na utege

$$\sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ml}} \right) \right] \quad (10)$$

- Uzgonsko djelovanje ulja na potopljene dijelova klipa

$$(-v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \quad (11)$$

- Statički tlaka stupca fluida

$$hA_0 \cdot (\rho_f - \rho_a) \quad (12)$$

- Površinska napetost radnog fluida

$$\Gamma \cdot c \quad (13)$$

- Varijacije gravitacijskog ubrzanja

- Korekcije uslijed tlaka okoline ovise o režimu rada

- Pretlačni režim rada
- Apsolutni režim rada

### 3.1.4.1. Pretlačni režim rada

Uz uvođenje navedenih korekcija jednačba (7) prelazi u oblik:

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ml}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_K + \alpha_C) \cdot (t - t_r)]} \quad (14)$$

Navedeni oblik vrijedi za tlačne vage koje koriste ulje kao radni medij, kod plinskih tlačnih vaga izostavlja se korekcija zbog površinske napetosti kapljevine i zanemaruje se utjecaj stupca radnog fluida, kao i njegovo uzgonsko djelovanje zbog značajno manje gustoće u odnosu na kapljevinu pa jednačba (7) prelazi u oblik (15).

$$p_e = \frac{\sum_i m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ml}} \right) \cdot g \cdot \cos \theta}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_K + \alpha_C) \cdot (t - t_r)]} \quad (15)$$

### 3.1.4.2. Rad tlačne vage u apsolutnom režimu rada

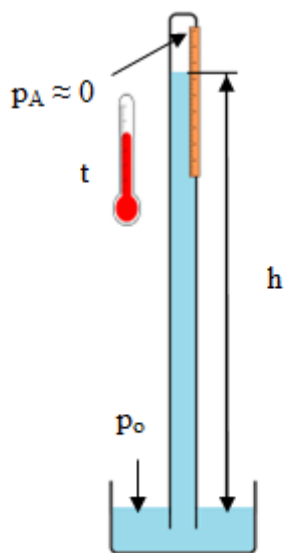
Tlačna vaga pokrije se zvonom, a zatim se vakuum pumpom evakuira volumen unutar zvona. Ovakav način mjerenja zahtijeva vakuum pumpu ili više njih sposobnih ostvariti i održavati tlak od oko 0.01 Pa. Za točnost mjerenja presudna je čistoća volumena unutra zvona, pa je potrebno koristiti materijale pogodne za vakuumsko okruženje kao i mazivo ulje vakuum pumpe s niskim tlakom isparivanja pri radnoj temperaturi. Niži zaostali tlak osigurava manju mjernu nesigurnost ukupnog određivanja efektivnog tlaka. Automatski sustav pozicioniranja utega na klip je pogodan radi eliminacije evakuacije volumena zvona kod svake pojedine mjerne točke. Radi smanjenja nesigurnosti mjerenja uslijed zaostalog tlaka potrebno je postaviti mjerilo zaostalog tlaka na zvono zbog razlike u očitavanju između unutrašnjosti zvona i okoline pripojenih cijevi za evakuaciju.

Iz jednačbe (15) izostavlja se utjecaj zraka na utege zbog toga što je zrak evakuiran te se dobiva izraz za izračun efektivnog tlaka u apsolutnom načinu rada te se dobiva jednačba oblika (16). Član  $\mu$  predstavlja zaostali tlak u unutrašnjosti evakuiranog prostora.

$$p_e = \frac{\sum_i m_i \cdot g \cdot \cos \theta}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_K + \alpha_C) \cdot (t - t_r)]} + \mu \quad (16)$$

### 3.2. Barometar

Barometar je mjerni instrument koji služi mjerenju atmosferskog tlaka. Mjerenje se zasniva na mjerenju visine stupca tekućine. Jednostavni prikaz barometra dan je na slici 6.



Slika 6. Barometar

Staklena cijev napunjena je živom, pretpostavlja se da je prostor iznad žive je evakuiran, a u stvarnosti se u tom prostoru nalaze živine pare. Uz navedenu pretpostavku dobiva se izraz (18) za izračun atmosferskog tlaka  $p_o$ .

$$p_A = p_o - \rho gh \quad (17)$$

$$p_o = \rho gh \quad (18)$$

Gustoća tekućine ovisna je o temperaturi, pa je stoga potrebno mjeriti temperaturu i korigirati mjereni tlak.

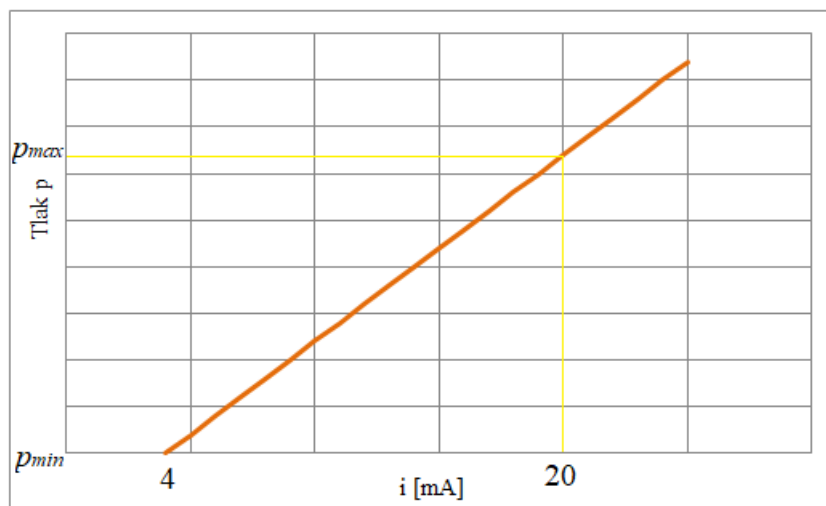
### 3.3. Pretvornici tlaka

Pretvornici tlaka su mjerni instrumenti koji pretvaraju mjereni tlak u električni signal proporcionalan tlaku. Svrha pretvaranja u električni signal je lakše mjerenje, pohranjivanje, prijenos i obrada mjernih podataka pomoću računala. Ovisno u modelu pretvornika izlazni električni signal može biti:

- Struja
- Napon
- Frekvencija

Pretvornici tlaka djeluju po principu mehaničke deformacije. Tlak koji se mjeri uzrokuje deformaciju mehaničkih osjetila unutar pretvornika, čiji se pomak od ravnotežnog stanja može mjeriti, a iskazuje se električnim signalom, najčešće u rasponu od 4 do 20 mA. Najčešće korišteni pretvornici tlaka su:

- Kapacitivni
- Otpornički
- Piezoelektrični
- Induktivni



**Slika 7. Pretvornici tlaka**

Na slici 7. prikazana je karakteristika pretvornika tlaka s strujom kao izlaznom električnom veličinom. Mjereni tlak računa se prema izrazu (19).

$$p = p_{min} + \frac{p_{max} - p_{min}}{20 - 4} \cdot (i - 4) \quad (19)$$

## 4. UMJERAVANJE

### 4.1. Općenito o umjeravanju

Umjeravanje, kalibriranje ili baždarenje je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima postavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Mjerni etalon stvarna je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav koja služi kao referenca za određivanje pouzdanosti drugih mjera.

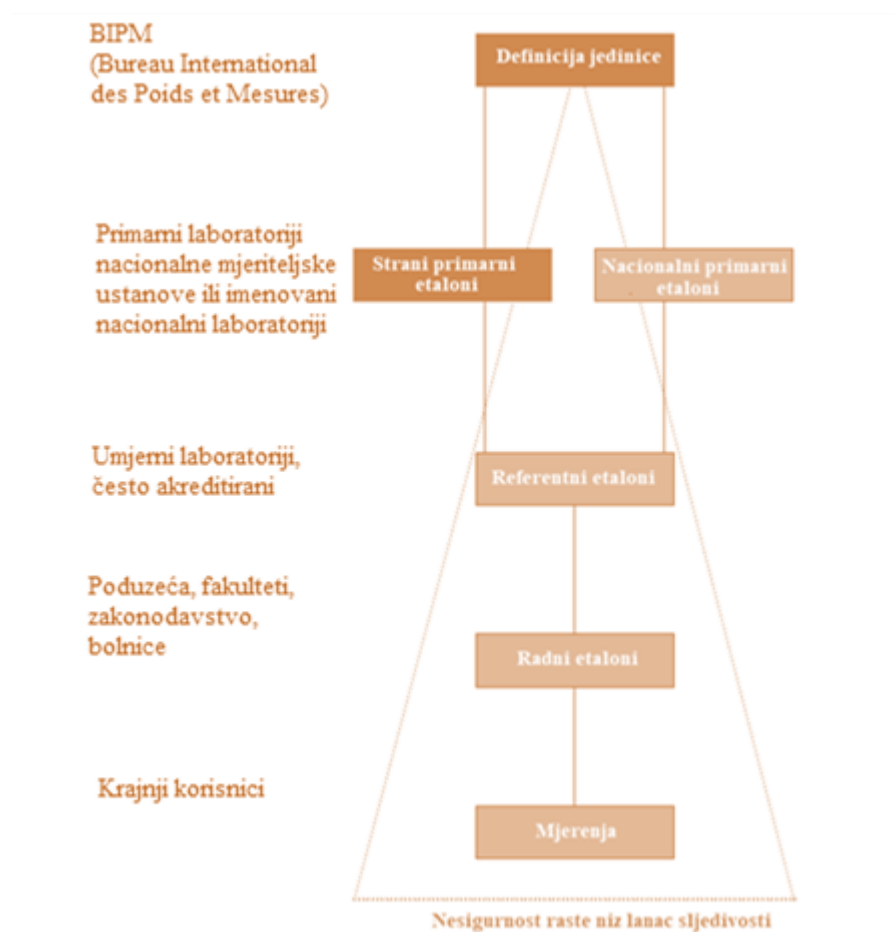
Četiri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. Uspostavljanje i prikaz sljedivosti
2. Osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima
3. Određivanje točnosti očitavanja mjerila
4. Utvrđivanje pouzdanost mjerila [1]

Mjerna sljedivost svojstvo je mjernog rezultata da ga se može dovesti u vezu s odgovarajućim etalom, obično državnim ili međunarodnim, preko neprekinutog lanca usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti. Prikaz lanca sljedivosti dat je na slici 8.

Umjeravanje je temelj osiguranja mjerne sljedivosti, obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari te se u pravilu postiže izravnom usporedbom s etalonima ili potvrđenim referentnim tvarima. Nakon umjeravanja izdaje se potvrda o umjeravanju, a najčešće se na umjereno mjerilo stavlja naljepnica.





Slika 8. Lanac sljedivosti

Sva mjerenja podliježu pogreškama, čime se mjerni rezultat razlikuje od istinite vrijednosti mjerene veličine pa je mjerna nesigurnost mjera za sumnju u rezultat mjerenja, tj. to je parametar pridružen mjernom rezultatu koji označuje rasipanje vrijednosti. Prvi korak u izračunu mjerne nesigurnosti je identifikacija izvora nesigurnosti. Potrebno je sagledati sve utjecajne faktore ispravnosti mjerenja:

- Mjerni instrument
- Pomoćna oprema
- Objekt i metoda mjerenja
- Nesigurnost mjerila
- Uzorkovanje
- Uvjeti okoliša i drugi utjecajni faktori

#### 4.1.1. Mjerna nesigurnost [3]

Mjerna nesigurnost može se odrediti na dva načina:

- Procjene tipa A - korištenje statistike, obično iz više ponovljenih mjerenja
- Procjene tipa B - procjene bazirane na iskustvu, iz vanjskih umjernica, iz proračuna, proizvođačkih specifikacija i sl.

Posljednji korak prilikom proračuna mjerne nesigurnosti je izračun kombinirane mjerne nesigurnosti svih izvora. Podatke iz svih izvora potrebno je prvo svesti na istu razinu pouzdanosti, tj. na standardnu nesigurnost  $u$ . Prije izračunavanja  $u$  sve sastavnice potrebno je svesti na jednake mjerne jedinice. Standardna nesigurnost računa se ovisno o tipu podataka na dva načina:

- Podaci dobiveni procjenama tipa A – standardan nesigurnost izračunava se iz standardne devijacije  $s$  za sve podatke dobivene mjerenjem

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (20)$$

- Podaci dobiveni procjenama tipa B – poznat je interval nesigurnosti u kojim se vjerojatno nalazi prava vrijednost ( $a$  je poluinterval nesigurnosti)

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Složena standardna mjerna nesigurnost  $u_c$  izračunava se kao korijen sume kvadrata standardnih mjernih nesigurnosti pojedinih sastavnica prema sljedećem izrazu:

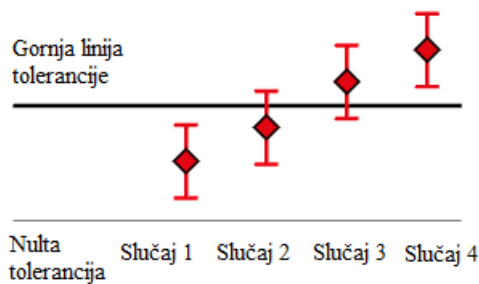
$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (22)$$

Proširena mjerna nesigurnost  $U$  dobiva se množenjem složene standardne mjerne nesigurnosti  $u_c$  s faktorom prekrivanja  $k$  koji je najčešće jednak 2. Rezultat mjerenja se ispravno izražava na sljedeći način:

$$X = \bar{X} \pm U = \bar{X} \pm k u_c \quad (23)$$

#### 4.1.2. Ocjenjivanje rezultata umjeravanja

Najčešće postupak umjeravanja obuhvaća i kriterij prihvatanja rezultata, tj. postoje tolerancijske granice unutar kojih je rezultat umjeravanja vrednovan kao 'prolaz', a izvan kojih se rezultat vrednuje kao 'pad'. Grafički prikaz toga dat je na slici 9.



**Slika 9. Tolerancijske granice**

Interpretacija rezultata umjeravanja sa slike:

- Slučaj 1 - rezultat se nalazi unutar granica tolerancije, te je jasno da je dobivena vrijednost prolazna
- Slučaj 2 - ne može se sa sigurnošću reći da li je rezultat prolazni ili ne, ovisi o tome da li se i nesigurnost uzima u obzir
- Slučaj 3 - vrijedi isto kao i za slučaj 2
- Slučaj 4 - rezultat je izvan tolerancijski granica, čak i kada se nesigurnost uzima u obzir te ovaj slučaj nije prolazni [5]

## 4.2. Umjeravanje mjerila tlaka

Umjeravanje mjerila tlaka vrši se direktnom usporedbom mjerenih vrijednosti umjeravanog instrumenta s vrijednostima referentnog etalona poznate točnosti i sljedivosti. Etaloni tlaka su instrumenti dugotrajne stabilnosti a to su u pravilu visokokvalitetni tekućinski manometri, tlačne vage i električna mjerila tlaka. Korištenje tekućinskih manometara je ograničeno za više tlakove zbog tražene visine stupca tekućine. Radni etaloni su redovito kalibrirani te je poznata njihova proširena mjerna nesigurnost u standardnim mjernim uvjetima (standardno ubrzanje gravitacije, temperatura okolnog zraka 20 °C). Kada se kalibracija vrši u nestandardnim uvjetima potrebno je uvesti korekcije u proračun izračuna tlaka.

U nastavku su opisane dvije upute za umjeravanje mjerila tlaka:

- EURAMET cg-17
- DKD-R 6-1

### 4.2.1. EURAMET cg-17 [6]

Navedena uputa vrijedi za sljedeće mjerne instrumente:

- Pretvornike tlaka
- Transmitere tlaka
- Manometre s analognim ili digitalnim prikazom

Za osiguranje dobrog umjeravanja mjerni instrument mora biti čist i u toplinskoj ravnoteži s okolišnim zrakom u laboratoriju, ne smije biti direktno izložen suncu te se treba nalaziti što bliže etalonskom mjerilu. Prilikom umjeravanja treba poštivati tvornički propisane upute o rukovanju s pojedinim uređajem.

Ovisno o zahtjevima klijenta i očekivanoj preciznosti mjerila odabire se metoda umjeravanja. Metode umjeravanja propisane ovom uputom su:

- Osnovna procedura umjeravanja
- Standardna procedura umjeravanja
- Opsežna procedura umjeravanja

#### 4.2.1.1. Osnovna procedura umjeravanja

Ova procedura umjeravanja provodi se ako je očekivana nesigurnost uređaja  $U$  uz faktor prekrivanja  $k = 2$  veća od 0,2%. Umjeravanje se provodi u šest mjernih točaka, uzlaznim i silaznim redoslijedom, dok se ponovljivost procjenjuje na temelju tri ponovljena mjerenja, preferirano na 50% mjerne skale.

#### 4.2.1.2. Standardna procedura umjeravanja

Procedura umjeravanja se koristi ako je očekivana mjerna nesigurnost uređaja  $U$  uz faktor prekrivanja  $k = 2$  veća od 0,05% i manja od 0,2%. Umjeravanje se provodi u jedanaest mjernih točaka uzlaznim i silaznim redoslijedom, a ponovljivost se procjenjuje temeljem tri ponovljena mjerenja u četiri mjerne točke, preferirano 20%, 40%, 60% i 80% mjerne skale.

#### 4.2.1.3. Opsežna procedura umjeravanja

Opsežna procedura mjerenja se provodi ako je očekivana mjerna nesigurnost uređaja  $U$  uz faktor prekrivanja  $k = 2$  manja od 0,05%. Umjeravanje se provodi kroz jedanaest mjernih točaka, u 3 mjerne serije.

### 4.2.2. DKD-R 6-1 [7]

DKD-R 6-1 je norma Njemačke službe za umjeravanje (*Deutscher Kalibrierdienst*) te se upotrebljava za sljedeća mjerila tlaka:

- Mjerila tlaka s Bourdonovom cijevi
- Električna mjerila tlaka
- Pretvornici tlaka s električnim izlazom

Prije početka umjeravanja potrebno je provjeriti da li je željeno ispitivano mjerilo umjerljivo, odnosno da li je stanje instrumenta prikladno za korištenje i sukladno s tehničkom dokumentacijom proizvođača. Mogućnost kalibracije provjerava se vanjskim pregledom uređaja i testovima funkcija uređaja.

Vanjski pregled obuhvaća:

- Vizualni pregled mogućih oštećenja
- Onečišćenje i čistoću
- Vizualni pregled natpisa i čitljivosti indikacija
- Pregled dokumentacije potrebne za kalibriranje

Funkcionalna provjera može obuhvaćati:

- Provjera zabrtvljenost sustava cijevi potrebnih za umjeravanje
- Kontrola električne pouzdanosti
- Pregled ispravnosti kontrolnih elemenata
- Postavljanje elemenata mjerne linije u definirane položaje

Prilikom umjeravanja moraju se uzeti u obzir atmosferski uvjeti, a umjeravanje mora biti provedeno u stabilnoj okolini temperature u granicama [18, 28] °C, s temperaturnim odstupanjima manjim od 1 K. Na rezultate umjeravanja utječu atmosferski tlak, relativna vlažnost zraka i temperatura te je te veličine potrebno tijekom umjeravanja mjeriti i evidentirati. Mjerilo tlaka trebalo bi biti ispitivano kao cjelina, odnosno treba umjeriti cijelu mjernu liniju ako je to moguće te je potrebno u obzir uzeti montažni položaj. Kalibracija se provodi u mjernim točkama ravnomjerno raspodijeljenom u kalibracijskom rasponu. Broj potrebnih mjernih serija ovisi o ciljanoj mjernoj nesigurnosti. Ukoliko ovisnost ispitivanog mjerila tlaka o momentu prilikom montiranja nije dovoljno dobro poznata, dodatnim stezanjem se mora osigurati ponovljivost ispitivanja, a vrijednost momenta se mora zabilježiti. Usporedba između mjernih vrijednosti umjeravanog mjerila i etalonskog mjerila može biti provedena tako da se tlak podesi prema vrijednostima koje pokazuje etalon ili prema vrijednostima koje pokazuje umjeravani uređaj.

Ovisno o broju mjernih serija i ciljanoj mjernoj nesigurnosti razlikuju se tri metode umjeravanja čiji su karakteristični podaci dati u tablici 1.

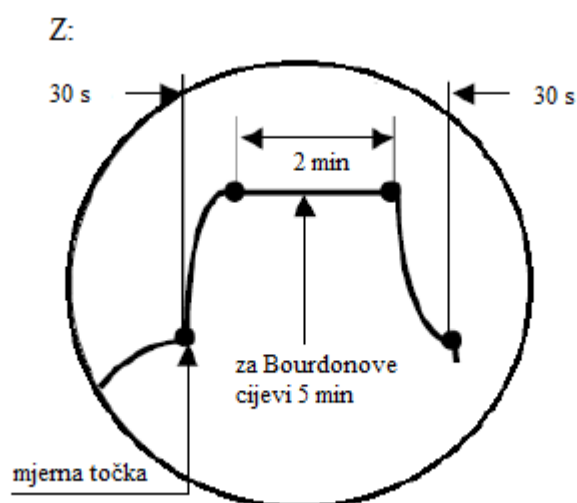
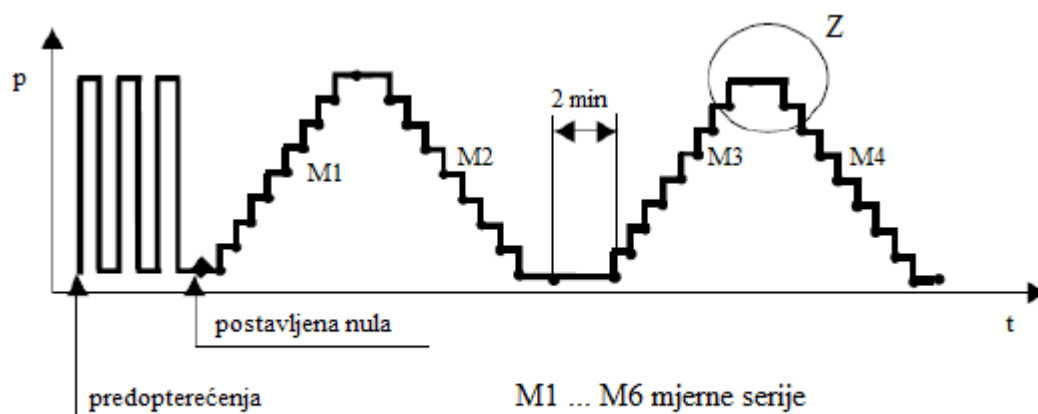
Tablica 1. Metode umjeravanja prema DKD-R 6-1

Metoda umjeravanja	Očekivana mjerna nesigurnost (udio mjernog područja) (*)	Broj mjernih točaka uključujući nulu	Broj predopterećenja	Promjena opterećenja + vrijeme čekanja (**)	Vrijeme čekanja u konačnoj vrijednosti mjernog područja (***)	Broj mjernih serija	
	%			sekunde	minute	Uzlazno	Silazno
A	<0,1	9	3	>30	2	2	2
B	0,1...0,6	9	2	>30	2	2	1
C	>0,6	5	1	>30	2	1	1
(*)	Podaci o točnosti od strane proizvođača najčešće su iskazani postotkom mjernog raspona, pa se i ovdje kao referentna vrijednost za odabir metode umjeravanja uzima mjerni raspon.						
(**)	Potrebno je čekati da se mjerena vrijednosti na umjeravanom uređaju i etalonu ustale prije očitavanja						
(***)	Za Bourdonove cijevi vrijeme čekanje je minimalno 5 minuta						

Trajanje predopterećenja na najvećoj vrijednosti i vrijeme između dva predopterećenja treba biti najmanje 30 sekundi. Nakon predopterećenja i nakon postizanja stacionarnog stanja, umjeravani uređaj treba nulirati. Vrijeme između dvije uzastopne mjerne točke mora biti jednako između svih točaka i mora najmanje iznositi 30 sekundi. Vrijednost na umjeravanom mjerilu može se očitati najranije 30 sekundi nakon promjene vrijednosti mjerne točke. Vrijeme čekanja između mjernih serija mora biti najmanje 2 minute, a kod mjerila s Bourdonovim cijevima najmanje 5 minuta što je i prikazano na detalju Z slike 10.

#### 4.2.2.1. Metoda A umjeravanja

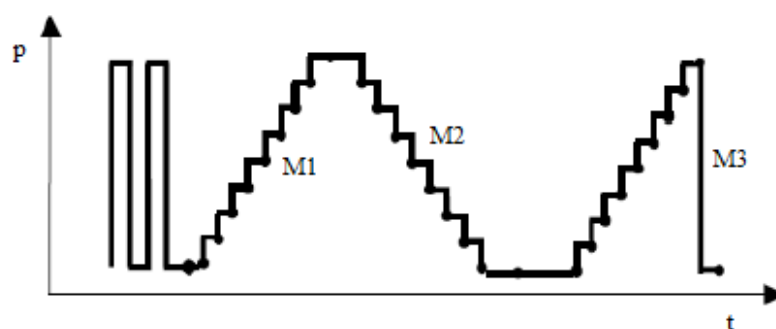
Na slici 10. je prikaz umjeravanja metodom A. Metoda A je najzahtjevnija i najdugotrajnija metoda umjeravanja ali daje i najtočnije rezultate. Sastoji se od po dvije uzlazne i dvije silazne serije mjerenja, uz osnovne 4 mjerne serije mogu se provesti i dodatne dvije ako je to potrebno.



Slika 10. Metoda A

#### 4.2.2.2. Metoda B umjeravanja

Slika 11. prikazuje umjeravanje metodom B.

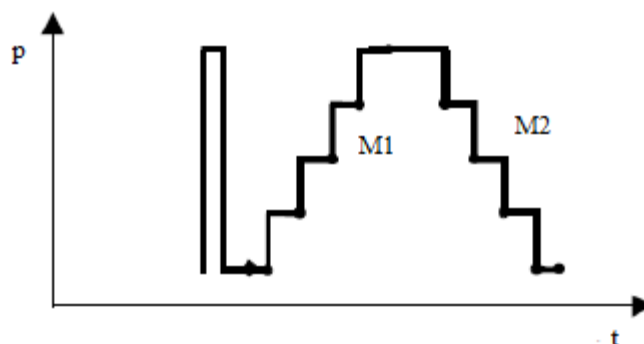


Slika 11. Metoda B



#### 4.2.2.3. Metoda C umjeravanja

Umjeravanja metodom C je najjednostavnije i najbrže ali daje i nešto lošije rezultate. Slika 12. prikazuje umjeravanje metodom C.



Slika 12. Metoda C

Umjeravanje mjerila za potrebe ovog završnog zadatka provedeno je metodom C.

### 4.3. Načini umjeravanja mjerila negativnog tlaka [2]

Ovisno o načinu mjerenja etalonskog negativnog tlaka tlačnom vagom umjeravanje instrumenta može se podijeliti u 3 kategorije:

- Metoda 1 – dva apsolutna mjerila tlaka
- Metoda 2 – negativni tlak u zvonu
- Metoda 3 – 'viseći' klip

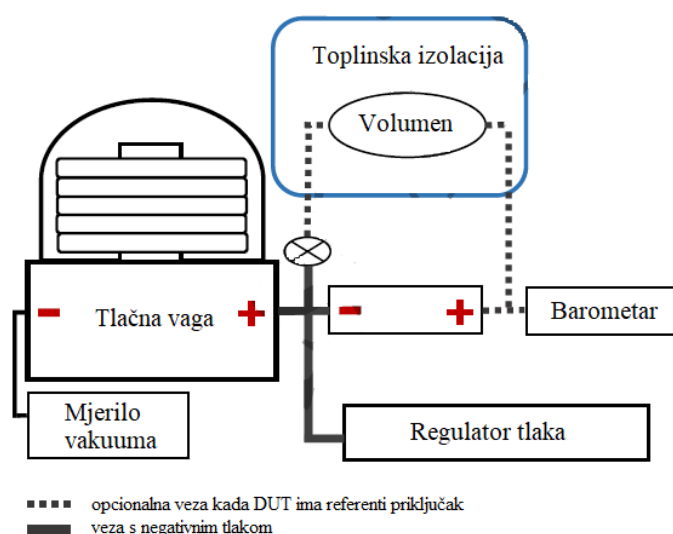
#### 4.3.1. Metoda 1

Za mjerenje tlaka koristi se tlačna vaga u apsolutnom načinu rada i barometar. Slika 13. prikazuje shemu spajanja potrebnu za mjerenje negativnog tlaka. Ispitivano mjerilo (DUT) povezano je '-' priključkom na regulator tlaka. Tlačna vaga povezuje se s mjerilom vakuumu s '-' priključkom. Za očitavanje atmosferskog tlaka koristi se barometar povezan s '+' na DUT, preporučljivo je smjestiti DUT i barometar na istu visinu da se izbjegne izračunavanje korekcije uslijed razlike visina.

Postoji mogućnost dodavanje volumena čija se temperatura regulira te je time moguće kontrolirati atmosferski tlak. Pošto su za mjerenje tlaka potrebna dva instrumenta ova metoda je skupa.

Negativni tlak  $p_{neg}$  izračunava se kao razlika apsolutnog tlaka tlačne vage  $p_{abs}$  i  $p_{atm}$  očitano na barometru. Navedeno je prikazano u izrazu (24).

$$p_{neg} = p_{abs} - p_{atm} \quad (24)$$

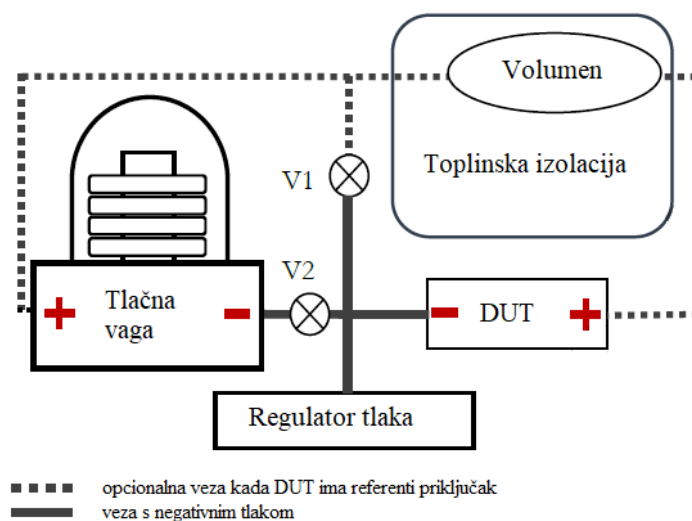


Slika 13. Metoda 1 umjeravanja

Umjeravanje mjerila u ovom završnom radu provodi se ovom metodom.

#### 4.3.2. Metoda 2

Ova metoda se zasniva na mjerenju u apsolutnom načinu rada pri čemu je mjerni priključak otvoreni prema atmosferi, a tlak u zvonu predstavlja negativni tlak. Za razliku od uobičajenog načina rada, ovdje je priključak '-' ispitivanog mjerila priključen na '-' priključak tlačne vage koji je priključen na zvono gdje se generira negativan tlak. Toplinski izolirani volumen može se koristiti za povećanje stabilnosti okolnog zraka. Na slici 14. prikazana je shema spajanja.

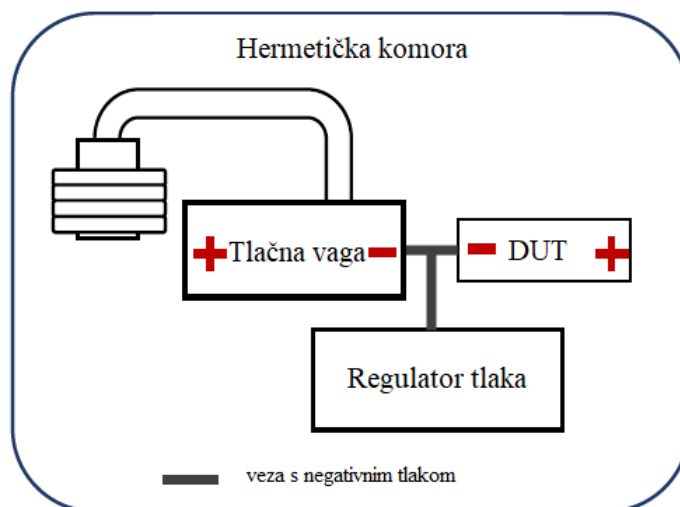


Slika 14. Metoda 2 umjeravanja

Prednost pred prvom metodom je što je potreban samo jedan instrument, ali je potrebno dugo vrijeme stabilizacije tlaka.

#### 4.3.3. Metoda 3

Metoda s 'visećim' klipom koristi se za mjerenje negativnog tlaka s naopako montiranim sklopom klip-cilindar. Korišteni instrument je izrađen namjenski samo za mjerenje negativnog tlaka te se koristi u pretlačnom načinu rada. Za postizanje ravnoteže masa sklopa klip-cilindra i dodatnih utega mora biti podignuta silom usisa, odnosno silom negativnog tlaka. Radi kontrole atmosferskog tlaka koristi se hermetička komora.



Slika 15. Metoda 3 umjeravanja

## 5. MEĐULABORATORIJSKA USPOREDBE EURAMET 1170

### 5.1. EURAMET

EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) je europsko udruženje nacionalnih mjeriteljskih institucija koje koordinira suradnju nacionalnih mjeriteljskih instituta na područjima kao što su metrologija, sljedivost mjerenja u SI jedinicama, međunarodno priznavanje nacionalnih mjernih standarda i pripadajuće sposobnosti umjeravanja i mjerenja. Zadatak EURAMET-a je razviti i raširiti integriranu, ekonomičnu te međunarodno konkurentnu mjeriteljsku infrastrukturu za Europu, uvažavajući potrebe industrije i poslovanja država. EURAMET je odgovoran za izradu i provedbu *Europskog programa mjeriteljstva* (EMRP) i *Europskog mjeriteljskog programa za inovacije i istraživanje* (EMPIR), koji su osmišljeni kako bi se potaknula suradnja između europskih nacionalnih mjeriteljskih institucija i partnera u industriji ili akademskoj zajednici. Temelj za suradnju je vođenje na nižoj razini projekata koji se odnose na istraživanje, međulaboratorijske usporedbe i proučavanje sljedivosti. Projektima upravljaju tzv. skupine izvjestitelja s jednim članom iz svake zemlje [1]. Primjer takve suradnje je i međulaboratorijska usporedba u području od -950 do 0 hPa nazvana projekt EURAMET 1170. Rezultati navedene suradnje integrirani su u mjerenja provedena u okviru ovog završnog rada.

### 5.2. Projekt EURAMET 1170 [8]

Cilj međulaboratorijske usporedbe EURAMET 1170 je bila procjena jednakosti u određivanju negativnog tlaka, tj. potlaka u rasponu od -950 do 0 hPa nacionalnih mjeriteljskih ustanova država sudionika projekta. U sklopu projekta bilo je potrebno izvršiti umjeravanje na prijenosnom etalonu Beamex MC5 no. 2551865 prikazanom na slici 16. Nominalne točke mjerenja tlaka u usporedbi bile su: 0 kPa, -20 kPa, -40 kPa, -60 kPa, -80 kPa, -95 kPa i iste točke u uzlaznom slijedu. Umjeravanje se provodilo metodom A prema DKD-R 6-1. U projektu je sudjelovalo 14 laboratorija pobrojanih u tablici 2. Svaki od laboratorija nakon izvršenih mjerenja trebao je dostaviti podatke o odstupanju od prijenosnog mjerila  $x_i$ , standardnu nesigurnost mjerenja te opis mjerne linije i certifikate o umjeravanju.



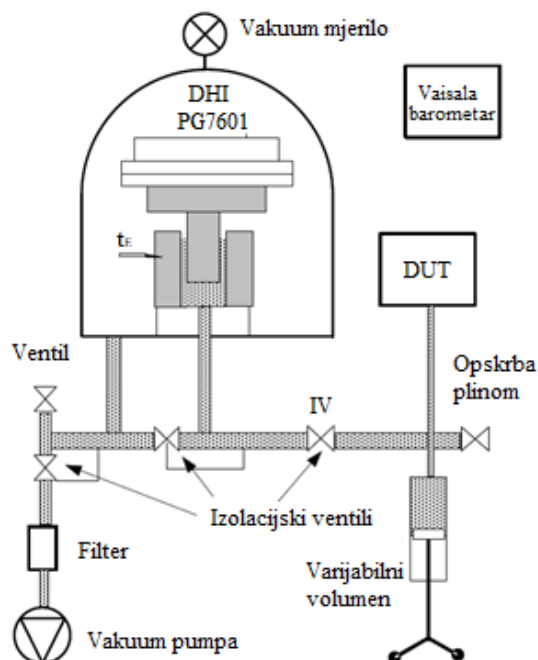
Slika 16. Prijenosno mjerilo EURAMET 1170

Tablica 2. Laboratoriji sudionici

Laboratorij	Država
BEV	Austrija
CMI	Češka
DANIAmet-FORCE	Danska
EIM	Grčka
HMI/FSB-LPM	Hrvatska
INM	Rumunjska
IPQ	Portugal
LNE	Francuska
MCCAA	Malta
METROSERT	Estonija
MIKES	Finska
MIRS/IMT/LMT	Slovenija
NSAI	Irska
UME	Turska

### 5.2.1. Mjerenje laboratorija HMI/FSB-LPM

Shema mjerne linije FSB-LPM laboratorija prikazana je na slici 17.



Slika 17. Shema mjerne linije HMI/FSB-LPM [9]

Mjerenja su provedena po principu prve metode umjeravanja mjerila negativnog tlaka s dva apsolutna mjerila tlaka. Korištena je apsolutna tlačna vaga DHI PG7601 za mjerenje apsolutnog tlaka i Vaisala barometar PTB 220 za mjerenje atmosferskog tlaka. Negativni tlak računan je kao razlika očitavanja tlačne vage i barometra.

Standardna nesigurnost mjerenja  $u_{LPM}$  izračunata je kao kombinirana standardna nesigurnost uzimajući u obzir nesigurnost tlačne vage  $u_{p/c}$ , nesigurnost barometra  $u_{amb}$  (u obzir uzet utjecaj histereze, rezolucije, ponovljivosti i nulto odstupanje) i nesigurnost prijenosnog standarda  $u_{DUT}$  (u obzir uzet utjecaj histereze i ponovljivosti) čime se dobiva izraz:

$$u_{LPM} = \sqrt{u_{p/c}^2 + u_{amb}^2 + u_{DUT}^2} \quad (25)$$

### 5.2.2. Analiza podataka

Referentna vrijednost odstupanja  $x_{ref}$  izračunata je Monte Carlo metodom. Za svaki laboratorij izračunata je razlika između odstupanja laboratorija i referente vrijednosti  $d_i$  te proširena standardna nesigurnost  $U(d_i)$  koja uzima u obzir nesigurnost pojedinog laboratorija i nesigurnost referentne vrijednosti mjerenja i nesigurnost prijenosnog mjerila.

$$d_i = x_i - x_{ref} \quad (26)$$

$$U(d_i) = 2 \sqrt{u(d_i)^2 + u(x_{ref})^2 + u_{stab}^2} \quad (27)$$

Da bi rezultati mjerenja laboratorija bili zadovoljavajući mora se zadovoljiti sljedeća nejednakost:

$$|d_i| < U(d_i) \quad (28)$$

Za svaki laboratorij naknadno je izračunat faktor slaganja  $E_n$  koji se da bi mjerenja bila zadovoljavajuća mora nalaziti u intervalu  $[-1,1]$ .

$$E_n = \frac{d_i}{U(d_i)} \quad (29)$$

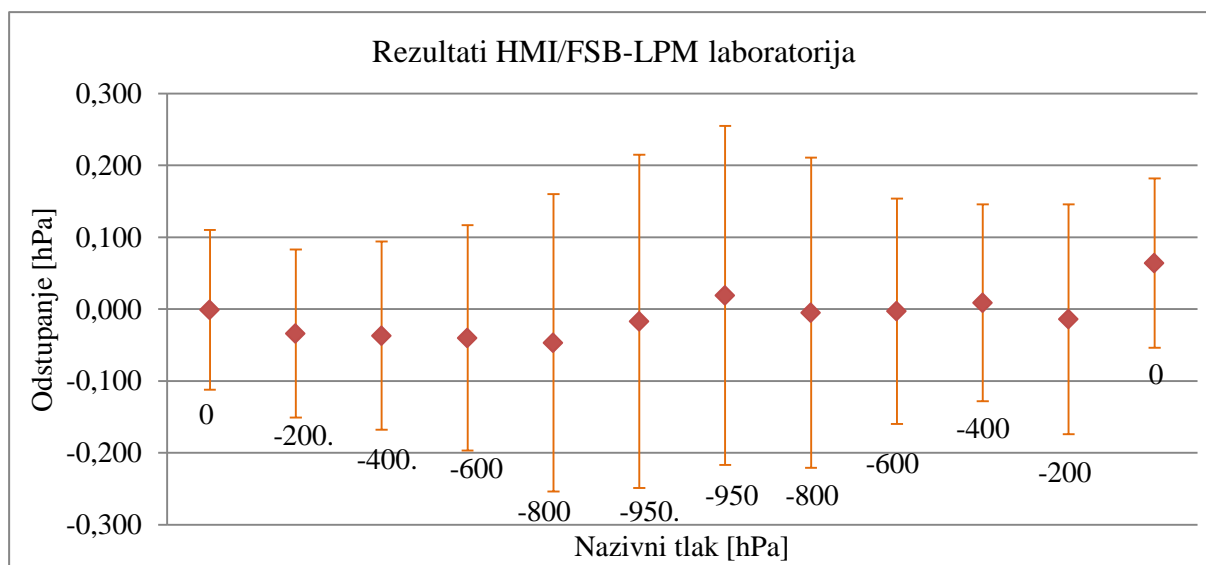
U tablici je prikaz rezultata HMI/FSB-LPM laboratorija.

Tablica 3. Prikaz rezultata HMI/FSB-LPM

Broj mjerjenja	Nominalni tlak [hPa]	$x_{LPM}$ [hPa]	$u_{LPM}$ [hPa] $k=1$	$u_{LPM}$ [hPa] $k=2$	$d_{LPM}$ [hPa]	$U(d_{LPM})_{EURAMET}$ [hPa] $k=2$	$E_n$
1.	0	0,000	0,056	0,112	-0,001	0,111	-0,01
2.	-200	0,255	0,060	0,120	-0,034	0,117	-0,29
3.	-400	0,510	0,068	0,136	-0,037	0,131	-0,28
4.	-600	0,759	0,080	0,160	-0,040	0,157	-0,26
5.	-800	1,000	0,106	0,212	-0,047	0,207	-0,23
6.	-950	1,139	0,119	0,238	-0,017	0,232	-0,07
7.	-950	1,158	0,120	0,240	0,019	0,236	0,08
8.	-800	1,014	0,110	0,220	-0,005	0,216	-0,02
9.	-600	0,763	0,080	0,160	-0,003	0,157	-0,02
10.	-400	0,518	0,070	0,140	0,009	0,137	0,06
11.	-200	0,246	0,060	0,120	-0,014	0,160	-0,12
12.	0	0,047	0,060	0,120	0,064	0,118	0,54

U dijagramu na slici 18. prikazani su rezultati mjerenja HMI/FSB-LPM laboratorija za svaku mjernu točku s pripadajućim odstupanjima od referente vrijednosti i nesigurnošću mjerenja.





Slika 18. Prikaz rezultata HMI/FSB-LPM

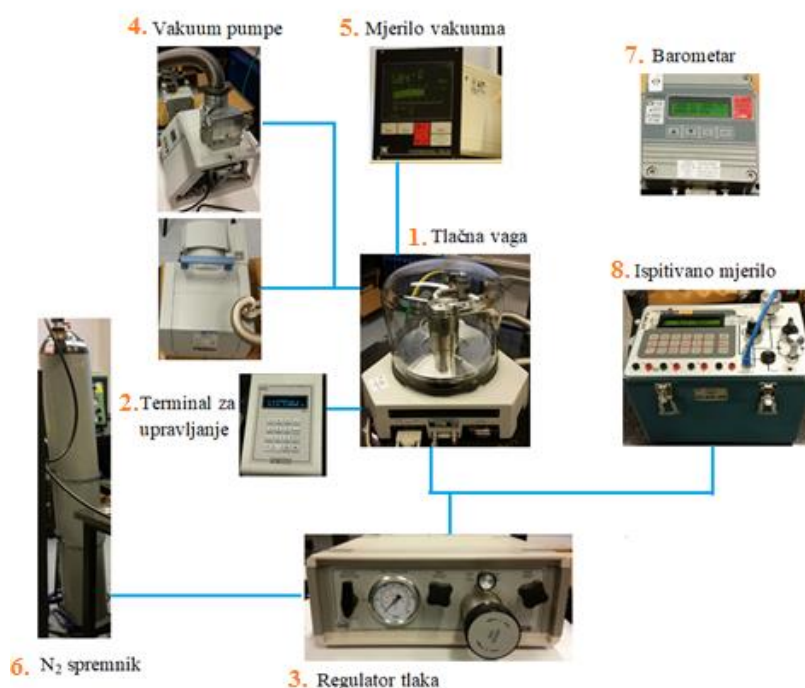
Iz rezultata je vidljivo da su mjerenja FSB laboratorija zadovoljavajuća jer su zadovoljeni uvjeti o vrijednosti  $E_n$  i nejednakost (28).

Stupac  $d_{LPM}$  u tablici 3. predstavlja korekciju koja je integrirana u mjerenja u okviru ovog završnog rada.

## 6. PROJEKTIRANJE MJERNE LINIJE I UMJERAVANJE

### 6.1. Sastavljanje mjerne linije

Mjerna linija za umjeravanje identična je onoj korištenoj u Međulaboratorijskoj usporedbi EURAMET 1170 čija je shema prikazana na slici 17. s razlikom da se na mjestu DUT-a ne nalazi prijenosno mjerilo Beamex MC5 no. 2551865 već ispitivano mjerilo. Na slici 19. je prikazana shema korištene mjerne linije.

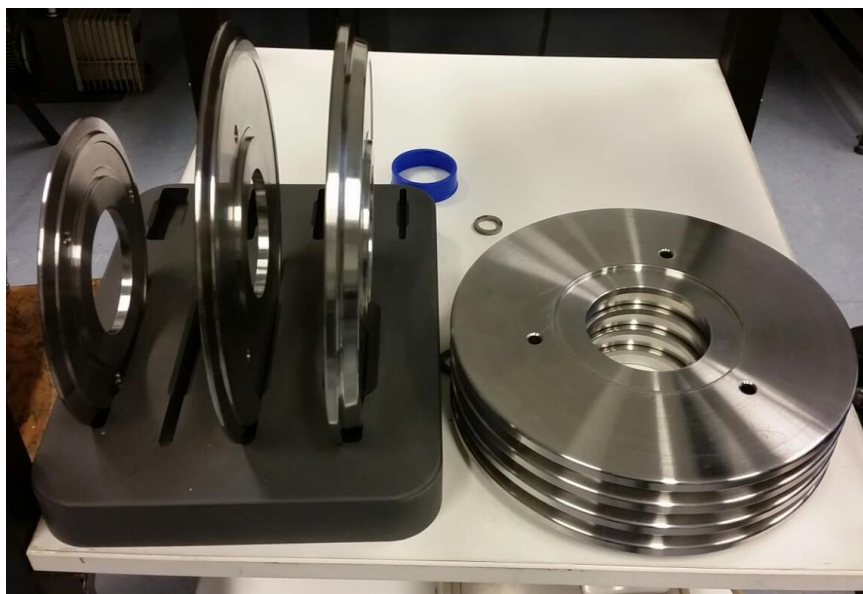


Slika 19. Shema projektirane mjerne linije

#### 6.1.1. Tlačna vaga DHI PG 7601 [10]

Korištena je tlačna vaga DHI PG 7601 u apsolutnom načinu rada označena s oznakom 1. na slici 19.

Na slici 20. je prikaz seta utega korištenih u umjeravanju. Unutar zvona zahtijevana je velika čistoća zraka te se za baratanje utezima koriste posebne rukavice.



Slika 20. Prikaz utega

U tablici 4. prikazani su podaci potrebni za izračuna efektivnog tlaka

Tablica 4. Podaci iz umjernice za DHI PG 7601 [11]

DHI PG 7601	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost ( $k=2$ )
Efektivna površina	$A_o$	9,805024E-04	$m^2$	2,70E-08
Koeficijent distorzije	$l$	4,200000E-07	$bar^{-1}$	0
Volumen za koji se radi korekcija	$v$	0,000000E+00	$m^3$	0,5
Ubrzanje sile teže za LPM	$g$	9,806218	$m/s^2$	0,00002
Opseg klipa	$G$	1,109735E-01	m	0
Koef.temp.ekspanzije	$a_{p+c}$	9,00E-06	$^{\circ}C^{-1}$	2,00E-06

U tablici 5. su dani podaci o masama iz umjernice korišteni u umjeravanju.

**Tablica 5. Podaci o utezima [11]**

	Oznaka na utegu	Masa utega	Nesigurnost mase	Nominalni tlak	Gustoća utega	Nesigurnost gustoće
		$m$	$u_m$	$p_n$	$r_m$	$u_{rm}$
		g	g	bar	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
	o.u.	499,99900	0,1000	0,050	10080,0	75
	dodatak	300,00340	0,0000	0,030	7975,0	75
	dodatak	0,00000	0,0000	0,000	7975,0	75
original utezi	1	100,00110	0,0004	0,010	7975,0	75
	2	199,99820	0,0006	0,020	7975,0	75
	3	200,00160	0,0006	0,020	7975,0	75
	4	500,0031	0,0015	0,050	7975,0	75
	5	1000,013	0,0025	0,100	7975,0	75
	6	2000,026	0,0058	0,200	7975,0	75
	7	2000,026	0,0046	0,200	7975,0	75
	8	4500,024	0,0067	0,450	7975,0	75
	9	5000,044	0,0089	0,500	7975,0	75
	10	5000,062	0,0086	0,500	7975,0	75
	11	5000,011	0,0072	0,500	7975,0	75
	12	5000,044	0,0077	0,500	7975,0	75
	13	5000,035	0,0090	0,500	7975,0	75

Terminal za upravljanje (2. slika 19.) prikazan na slici 21. služi za nadzor i upravljanje radom vage, opremljen je zaslonom i tipkovnicom. Položaj sklopa se mjeri te se na terminalu pokazuje kad je klip točno na sredini te se tada vrši očitavanje.



**Slika 21. Terminal za upravljanje**

Regulator tlaka (3. slika 19.) služi za kontroliranje radnog tlaka u sustavu. Otvaranjem dovodnog ventila u sustav ulazi radni medij iz spremnika, zatvaranje dovoda medija vrši se pritiskom na gumb čime je omogućena fina regulacija ispitnog tlaka. Regulator tlaka MPC1 prikazan je na slici 22.



**Slika 22. Regulator MPC1**

Mjerna linija se sastoji od dvije pumpe (4. slika 19.) radi osiguranja brže eliminacije zraka iz volumena zvona. Zaostali tlak u zvonu se mjeri vakuum mjerilom (5. slika 19.).

Spremnik radnog medija prikazan je oznakom 6. na slici 19. Unutar spremnika nalazi se čisti dušik 99,999 %.

Atmosferski tlak mjeri se Vaisala barometrom prikazanim oznakom 7. na slici 19. Mjerna nesigurnost barometra je 0,6 Pa.

Uz navedene komponente mjerna linija se sastoji i od spojnih cijevi.

### 6.1.2. Ispitivano mjerilo

Umjeravani instrument (8. slika 19.) je kalibrator tlaka prikazan na slici 23.



**Slika 23. Umjeravani kalibrator tlaka**

U tablici 6. se nalaze podaci o umjeravanom mjerilu.

**Tablica 6. Podaci o umjeravanom mjerilu**

Mjerilo	Kalibrator tlaka
Proizvođač	Marus ATM, model PC M
Tvornički broj	TL KAL 02
Mjerno područje	-1...2 bar
Jedinica tlaka	bar/mbar
Podjela skale	0.1 mbar
Razred točnosti	0.1 % FS
Vlasnik mjerila	FSB-LPM

Iz propisane točnosti instrumenta proizlazi da su granice tolerancije [-3, 3] mbar.

## 6.2. Postupak umjeravanja

Prije početka umjeravanja mora se provjeriti ispravnost i čistoća komponenata mjerne linije. Proveden je postupak umjeravanja metodom C prema DKD-R 6-1. Etalonski tlak ostvaren je preko dva apsolutna mjerila tlaka prema metodi 1. Odabrane mjerne točke su identične onima u EURAMET 1170 usporedbi s razlikom da je krajnji tlak -900 mbar a ne -950 mbar. Prije početka umjeravanja sustav se predopterećuje do maksimalnog tlaka i vraća na 0. Sustav se na svakoj mjernog točki mora ponovno opterećivati zbog toga što ne postoji automatsko dodavanje utega pa je za svaku mjernu točku potrebno skinuti stakleno zvonu i ručno dodati/oduzeti utege.

U tablici 7. je dana kombinacija utega korištenih za pojedinu mjernu točku.

Tablica 7. Kombinacija utega

Redni broj ispitne točke	Nazivni tlak	Tlak $p$	Oznaka utega									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	mbar	bar										
1.	0	0,00										
2.	-200	0,80		2				6			9	
3.	-400	0,60		2							9	
4.	-600	0,40		2			5	6				
5.	-800	0,20		2			5					
6.	-900	0,10		2								
7.	-900	0,10		2								
8.	-800	0,20		2			5					
9.	-600	0,40		2			5	6				
10.	-400	0,60		2							9	
11.	-200	0,80		2				6			9	
12.	0	0,00										

### 6.2.1. Izračun efektivnog tlaka tlačne vage

Izračun efektivnog tlaka tlačne vage proveden je u programu Excel, negativni tlak izračunava se oduzimanjem atmosferskog tlaka koji se mjeri barometrom od efektivnog tlaka tlačne vage prema izrazu (24).

Dobivena vrijednost etalonskog negativnog tlaka  $p_{neg}$  ispravljena je korekcijom  $d_{LPM}$  iz EURAMET 1170 usporedbe čime se dobiva korigirani efektivni tlak  $p'_{neg}$ .

$$p'_{neg} = p_{neg} - d_{LPM} \quad (30)$$



Vrijednost EURAMET 1170 korekcije za nazivni tlak od -900 mbar dobiva se linearnom interpolacijom, pa je konačna vrijednost korekcije izvedene iz EURAMET usporedbe dana u tablici 8.

**Tablica 8. EURAMET korekcija**

Nazivni tlak	Korekcija EURAMET	
	mbar	
	M1	M2
0	-0.001	0.064
-200	-0.034	-0.014
-400	-0.037	0.009
-600	-0.040	-0.003
-800	-0.047	-0.005
-950	-0.027	0.011

Rezultati proračuna negativnog etalonskog tlaka provedenog u Excelu dani su u tablici 9.

**Tablica 9. Proračun etalonskog tlaka**

Redni broj mjerne točke	Nazivni tlak	Tlak ispod zvona $\mu$	Apsolutni tlak $p_{abs}$	Atmosferski tlak $p_{atm}$	Negativni tlak $p_{neg}$	Korekcija EURAMET $u_{LPM}$	Korigirani tlak etalona $p_{neg}'$
	mbar	Pa	bar	bar	mbar		
1.	0				0,000	-0,001	0,001
2.	-200	0,7	0,800082	1,001370	-201,288	-0,034	-201,254
3.	-400	0,7	0,600063	1,001250	-401,187	-0,037	-401,150
4.	-600	0,5	0,400042	1,001050	-601,008	-0,040	-600,968
5.	-800	0,5	0,200023	1,000990	-800,967	-0,047	-800,920
6.	-900	0,41	0,100012	1,001010	-900,998	-0,027	-900,971
7.	-900	0,41	0,100012	1,001000	-900,988	0,011	-900,999
8.	-800	0,5	0,200023	1,000050	-800,027	-0,005	-800,022
9.	-600	0,5	0,400042	1,000800	-600,758	-0,003	-600,755
10.	-400	0,5	0,600058	1,000700	-400,642	0,009	-400,651
11.	-200	0,5	0,800077	1,000650	-200,573	-0,014	-200,559
12.	0				0,000	0,064	-0,064

### 6.2.2. Rezultati umjeravanja na umjeravanom mjerilu

Očitani podaci na umjeravanom mjerilu dati su u tablici 10.

**Tablica 10. Očitavanje TL KAL 02**

Broj ispitne točke	Nazivni tlak	Očitovanje na umjeravanom mjerilu		Histereza
		$M1$	$M2$	$h=M2-M1$
		mbar		
1.	0	0,0	-0,2	-0,2
2.	-200	-201,8	-200,7	1,1
3.	-400	-402,2	-401,4	0,8
4.	-600	-602,6	-602,0	0,6
5.	-800	-802,7	-802,4	0,3
6.	-900	-902,7	-902,7	0,0

U tablici 10. je prikazana i izračunata histereza između silaznog i uzlaznog mjernog slijeda.

Utjecajni faktori za proračun mjerne nesigurnosti mjernog instrumenta TL KAL 02 su:

- Nesigurnost etalona

- Nesigurnost tlačne vage

$$u(E_1) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot p \quad (31)$$

- Nesigurnost barometra

$$u(E_2) = 0,6 \text{ Pa} \quad (32)$$

- Histereza

$$h = M2 - M1 \quad (33)$$

$$u(h) = \sqrt{\frac{1}{3} \left( \frac{h}{2} \right)^2} \quad (34)$$

- Rezolucija instrumenta

$$u(rez) = \sqrt{\frac{1}{3} \left( \frac{r}{2} \right)^2} \quad (35)$$

gdje je  $r = 0.1 \text{ mbar}$

Slijede tablice proračuna mjerne nesigurnosti za svaki nazivni tlak.

**Tablica 11. Proračun nesigurnosti 1**

Mjerna točka 1					
nazivni tlak	=	0	mbar		
Utjecajna veličina	Izvor	Iznos	Faktor razdiobe	Mjerna nesigurnost $u$	$u^2$
		mbar		mbar	mbar <sup>2</sup>
Etalon - tlačna vaga	iz umjernice	0	1	0	0
Etalon - barometar	iz umjernice	0.006	1	0.006	3.6E-05
Histereza	iz mjerenja	0.2	0.2887	0.0577	0.0033
Rezolucija uređaja	indikacija	0.1	0.2887	0.0289	0.0008
			$\Sigma u^2$	mbar	0.0042
			$U (k=1)$	mbar	0.0648
			$U (k=2)$	mbar	0.1297

**Tablica 12. Proračun nesigurnosti 2**

Mjerna točka 2					
nazivni tlak	=	-200	mbar		
Utjecajna veličina	Izvor	Iznos	Faktor razdiobe	Mjerna nesigurnost $u$	$u^2$
		mbar		mbar	mbar <sup>2</sup>
Etalon - tlačna vaga	iz umjernice	0.01	1	0.01	0.0001
Etalon - barometar	iz umjernice	0.006	1	0.006	3.6E-05
Histereza	iz mjerenja	1.1	0.2887	0.3175	0.1008
Rezolucija uređaja	indikacija	0.1	0.2887	0.0289	0.0008
			$\Sigma u^2$	mbar	0.1018
			$U (k=1)$	mbar	0.3191
			$U (k=2)$	mbar	0.6381

Tablica 13. Proračun nesigurnosti 3

Mjerna točka 3					
nazivni tlak	=	-400	mbar		
Utjecajna veličina	Izvor	Iznos	Faktor razdiobe	Mjerna nesigurnost $u$	$u^2$
		mbar		mbar	mbar <sup>2</sup>
Etalon - tlačna vaga	iz umjernice	0.02	1	0.02	0.0004
Etalon - barometar	iz umjernice	0.006	1	0.006	3.6E-05
Histereza	iz mjerenja	0.8	0.2887	0.2309	0.0533
Rezolucija uređaja	indikacija	0.1	0.2887	0.0289	0.0008
			$\Sigma u^2$	mbar	0.0546
			$U (k=1)$	mbar	0.2337
			$U (k=2)$	mbar	0.4673

Tablica 14. Proračun nesigurnosti 4

Mjerna točka 4					
nazivni tlak	=	-600	mbar		
Utjecajna veličina	Izvor	Iznos	Faktor razdiobe	Mjerna nesigurnost $u$	$u^2$
		mbar		mbar	mbar <sup>2</sup>
Etalon - tlačna vaga	iz umjernice	0.03	1	0.03	0.0009
Etalon - barometar	iz umjernice	0.006	1	0.006	3.6E-05
Histereza	iz mjerenja	0.6	0.2887	0.1732	0.0300
Rezolucija uređaja	indikacija	0.1	0.2887	0.0289	0.0008
			$\Sigma u^2$	mbar	0.0318
			$U (k=1)$	mbar	0.1782
			$U (k=2)$	mbar	0.3565

Tablica 15. Proračun nesigurnosti 5

Mjerna točka 5					
nazivni tlak	=	-800	mbar		
Utjecajna veličina	Izvor	Iznos	Faktor razdiobe	Mjerna nesigurnost $u$	$u^2$
		mbar		mbar	mbar <sup>2</sup>
Etalon - tlačna vaga	iz umjernice	0.04	1	0.04	0.0016
Etalon - barometar	iz umjernice	0.006	1	0.006	3.6E-05
Histereza	iz mjerenja	0.3	0.2887	0.0866	0.0075
Rezolucija uređaja	indikacija	0.1	0.2887	0.0289	0.0008
			$\Sigma u^2$	mbar	0.0100
			$U (k=1)$	mbar	0.0998
			$U (k=2)$	mbar	0.1997

Tablica 16. Proračun nesigurnosti 6

Mjerna točka 6					
nazivni tlak	=	-900	mbar		
Utjecajna veličina	Izvor	Iznos	Faktor razdiobe	Mjerna nesigurnost $u$	$u^2$
		mbar		mbar	mbar <sup>2</sup>
Etalon - tlačna vaga	iz umjernice	0.045	1	0.045	0.00203
Etalon - barometar	iz umjernice	0.006	1	0.006	3.6E-05
Histereza	iz mjerenja	0	0.2887	0.0000	0.0000
Rezolucija uređaja	indikacija	0.1	0.2887	0.0289	0.0008
			$\Sigma u^2$	mbar	0.0029
			$U (k=1)$	mbar	0.0538
			$U (k=2)$	mbar	0.1076

Proračun nesigurnosti pokazuje da dominantni utjecaj ima histereza te iako nesigurnost etalona raste prema mjernoj točki -900 mbar, zbog veće vrijednosti histereze gornjih mjernih točaka njihova mjerna nesigurnost je veća.

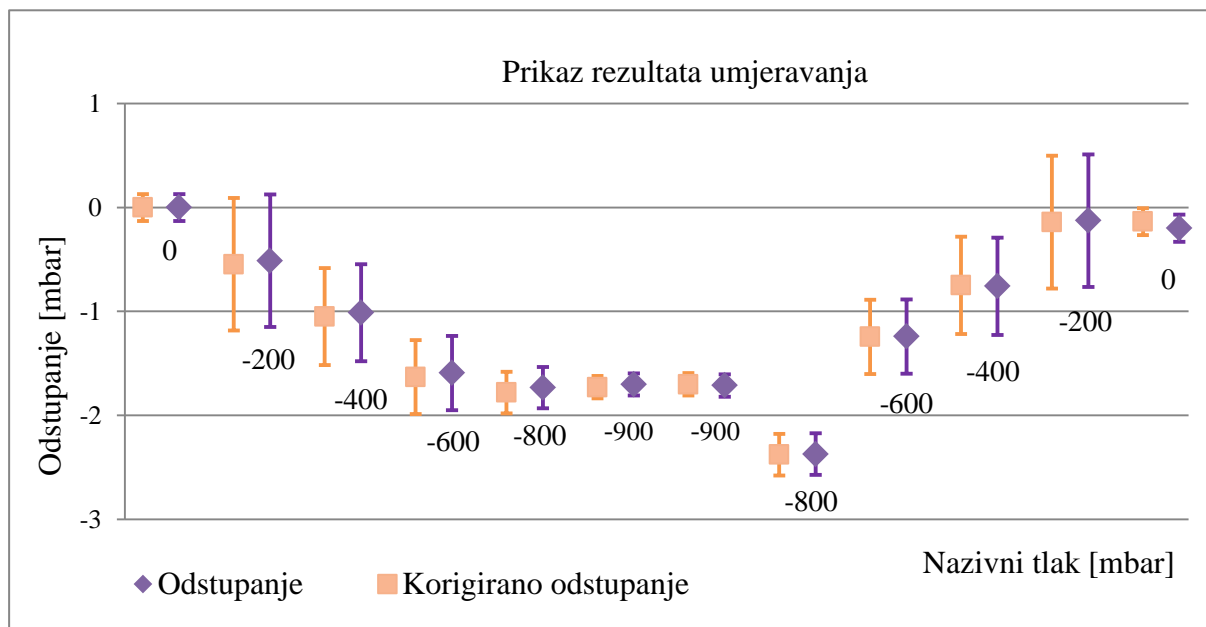
Daljnja usporedba rezultata vršena je posebno za uzlazne i silazne mjerne serije zbog toga što je iz EURAMET-ove usporedbe dostupna korekcija za obje serije mjerenja.

Prikaz rezultata umjeravanja s odstupanjima dan je u tablici 17.

Tablica 17. Prikaz rezultata umjeravanja

Broj ispitne točke	Nazivni tlak	Tlak etalona	Tlak etalona korigirani	Ispitivano mjerilo	Odstupanje	Korigirano odstupanje	Mjerna nesigurnost
mbar							
1.	0	0.0000	0.0010	0.0	0.000	-0.001	0.1297
2.	-200	-201.2876	-201.2536	-201.8	-0.512	-0.546	0.6381
3.	-400	-401.1872	-401.1502	-402.2	-1.013	-1.050	0.4673
4.	-600	-601.0075	-600.9675	-602.6	-1.592	-1.632	0.3565
5.	-800	-800.9669	-800.9199	-802.7	-1.733	-1.780	0.1997
6.	-950	-900.9975	-900.9705	-902.7	-1.702	-1.729	0.1076
7.	-950	-900.9875	-900.9985	-902.7	-1.712	-1.701	0.1076
8.	-800	-800.0272	-800.0222	-802.4	-2.373	-2.378	0.1997
9.	-600	-600.7583	-600.7553	-602.0	-1.242	-1.245	0.3565
10.	-400	-400.6419	-400.6509	-401.4	-0.758	-0.749	0.4673
11.	-200	-200.5732	-200.5592	-200.7	-0.127	-0.141	0.6381
12.	0	0.0000	-0.0640	-0.2	-0.200	-0.136	0.1297

Grafički prikaz rezultata s odgovarajućim nesigurnostima i odstupanjem s i bez korekcije dat je na dijagramu na slici 24.



Slika 24. Rezultati umjeravanja

Rezultati umjeravanja pokazuju da se odstupanje i nesigurnost nalaze unutar prihvatljivih granica za propisani razred točnosti umjeravanog instrumenta u oba slučaja, s i bez EURAMET korekcije.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu date su teorijske osnove pojma tlak te je opisan princip mjerenja tlaka kao i neka od mjerila tlaka. Dat je kratki pregled normi i uputa za mjerenje tlaka kao i mogućnosti umjeravanja mjerila negativnog tlaka. Negativni tlak je pojava kad je tlak manji od atmosferskog tlaka, te je to mjera za veličinu koliko je tlak manji od tlaka okoline. Mjerenje negativnog tlaka dobiva sve više na važnosti radi primjene u mnogim znanstvenim i tehnološkim procesima. Primjena metoda mjerenja apsolutnog tlaka i pretlaka za mjerenje negativnog tlaka rezultira značajnim pogreškama mjerenja pa se stoga provode studije i međulaboratorijske suradnje radi utvrđivanja normi i okvira za mjerenje negativnog tlaka.

EURAMET 1170 je međulaboratorijska usporedba između 14 nacionalnih mjeriteljskih ustanova u mjerenju negativnog tlaka u rasponu tlakova od -950 do 0 hPa u kojem je sudjelovao i HMI/LSB-LPM laboratorij. Korekcija tlaka laboratorija našeg fakulteta dobivena međulaboratorijskom usporedbom integrirana je u ovaj završni rad.

Praktični dio rada proveden je u Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a. U laboratoriju je sastavljena mjerna linija za umjeravanja mjerila negativnog tlaka i provedeno je umjeravanje kalibratora tlaka TL KAL 02 u mjernim točkama od 0 do -900 hPa.

Proračun efektivnog tlaka proveden je uvažavajući korekciju iz međulaboratorijske usporedbe EURAMET 1170. Korekcija se odnosi na izračun etalonskoga tlaka mjerne linije HMI/FSB-LPM laboratorija koja mjeri negativni tlak dvama mjerilima apsolutnog tlaka, tlačnom vagom i barometrom. Umjeravanje je provedeno prema metodi C iz DKD-R 6-1 uputa. Rezultati umjeravanja pokazuju da se odstupanje i nesigurnost nalaze unutar prihvatljivih granica za propisani razred točnosti umjeravanog instrumenta u oba slučaja, s i bez EURAMET korekcije.

Iz rezultata umjeravanja i iz EURAMET 1170 usporedbe zaključuje se da je mjerenju negativnog tlaka potrebno pristupiti s posebnom pažnjom zbog toga što norme za mjerenje pretlaka i apsolutnog tlaka primijenjene kod mjerenja negativnog tlaka ne daju zadovoljavajuće rezultate. Nadalje, proizlazi potreba za daljnjim istraživanjem mjerenja i kalibriranja mjerila negativnog tlaka radi izrade tehničkih smjernica za mjerenje negativnog tlaka.

## LITERATURA

- [1] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L., HMi–Znanstveno i/ili temeljno mjeriteljstvo, Svijet po mjeri, 2013.
- [2] Bentouati D., Plimmer M., Calibration methods for negative pressure down to -100 kPa, 2017.
- [3] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L., Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici), FSB-LPM, 2009.
- [4] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, The Institute of Measurement and Control, London, 1998.
- [5] Calibration uncertainty for non-mathematicians, Beamex
- [6] EURAMET: Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers (EURAMET cg-17,v.01), 2017.
- [7] DKD: Calibration of Pressure Gauges, Guideline DKD-R 6-1, 2003.
- [8] Saxholm S. et al., EURAMET.M.P-S9/EURAMET 1170, LOOP1 comparison in the negative gauge pressure range -950 to 0 hPa: Final report, 2016.
- [9] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L., Stašić T., REALIZATION OF NATIONAL ABSOLUTE PRESSURE STANDARD AT LPM, 2006.
- [10] PG 7000 Operation and Maintenance Manual, DH Instruments, Inc., 1998.-2002.
- [11] Potvrda o umjeravanju br. 11/16, Utezi za tlačnu vagu, Hrvatski mjeriteljski institut, 2016.



## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**